

EMILIO CHUVIECO

FUNDAMENTOS
DE
TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Segunda edición

EDICIONES RIALP, S.A.
MADRID

© 1990 EMILIO CHUVIECO
© 1995 EDICIONES RIALP, S. A.
Alcalá, 290. 28027 MADRID

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Primera edición: septiembre 1990
Segunda edición: julio 1995

I.S.B.N.: 84-321-2680-2
Depósito Legal: 23.304-1995

Impreso en España

Printed in Spain

Unigraf, S. A. Avda. Camara de la Industria, 38 Móstoles

ÍNDICE

Prólogo

Presentación

1. Nociones introductorias

- 1.1. Definición y objetivos
- 1.2. Un poco de historia
- 1.3. Desarrollo actual
- 1.4. Aspectos legales de la teledetección
- 1.5. Principales aplicaciones
- 1.6. Las ventajas de la observación espacial
- 1.7. Fuentes bibliográficas

2. Principios físicos de la Teledetección

- 2.1. Fundamentos de la observación remota
- 2.2. El espectro electro-magnético
- 2.3. Términos y unidades de medida
- 2.4. Principios y leyes de la radiación electro-magnética
- 2.5. El dominio óptico del espectro
 - 2.5.1. Características de la radiación energética en el espectro óptico
 - 2.5.2. Características de la vegetación en el espectro óptico
 - 2.5.3. Características del suelo en el espectro óptico
 - 2.5.4. Características del agua en el espectro visible.
- 2.6. El dominio del infrarrojo térmico
 - 2.6.1. Características de la radiación energética en el infrarrojo térmico
 - 2.6.2. Comportamiento espectral de la vegetación en el infrarrojo térmico
 - 2.6.3. Los suelos y el agua en el dominio térmico
- 2.7. La región de las micro-ondas
 - 2.7.1. Características de la radiación energética en la región de las micro-ondas
 - 2.7.2. Características de la vegetación en la región de las micro-ondas

2.7.3. Características del suelo y el agua	81
2.8. Interacciones de la atmósfera con la radiación electro-magnética	82
2.8.1. Absorción atmosférica	84
2.8.2. Dispersión atmosférica	85
2.8.3. Emisión atmosférica	87
3. Sistemas espaciales de teledetección	
3.1. Tipos de sistemas	89
3.2. Resolución de un sistema sensor	90
3.2.1. Resolución espacial	90
3.2.2. Resolución espectral	93
3.2.3. Resolución radiométrica	94
3.2.4. Resolución temporal	95
3.2.5. Relaciones entre distintos tipos de resolución	95
3.3. Sensores pasivos	97
3.3.1. Sensores fotográficos	98
3.3.2. Exploradores de barrido	103
3.3.3. Exploradores de empuje	108
3.3.4. Tubos de vidicón	109
3.3.5. Radiómetros de micro-ondas	110
3.4. Sensores Activos	111
3.4.1. Rádar	111
3.4.2. Lidar	114
3.5. Plataformas de teledetección espacial	116
3.5.1. El programa Landsat	116
3.5.1.1. Características orbitales	117
3.5.1.2. Instrumentos de observación	118
3.5.1.2.1. Sensor MSS	118
3.5.1.2.2. Sistema Vidicón	120
3.5.1.2.3. Sensor Thematic Mapper (TM)	121
3.5.1.3. El futuro del programa Landsat	123
3.5.2. El satélite SPOT	124
3.5.3. TIROS-NOAA	126
3.5.4. Satélites geo-estacionarios	128
3.5.5. Otros proyectos de observación terrestre	129
4. Bases para la interpretación de imágenes	
4.1. Fijación de objetivos: escala y leyenda de trabajo	132
4.2. Selección del material de trabajo	137
4.2.1. Tipo de sensor	137
4.2.2. Fecha de adquisición	137
4.2.3. Soporte de las imágenes	138
4.3. Selección del método de análisis: ¿tratamiento visual o digital?	141

4.4. Fases del proceso de trabajo	1
5. Análisis visual de imágenes	
5.1. Familiarización con imágenes analógicas	1
5.1.1. Información incluida en los productos fotográficos	1
5.1.2. Referenciación geográfica de la imagen	1
5.2. Criterios visuales para la interpretación de imágenes	1
5.2.1. Tono	1
5.2.2. Color	1
5.2.3. Textura	1
5.2.4. Situación espacial	1
5.2.5. Periodo de adquisición	1
5.2.6. Otros criterios de análisis	1
5.3. Elementos de análisis visual	1
5.3.1. Características geométricas de una imagen espacial	1
5.3.2. Efecto de la resolución espacial en el análisis visual	1
5.3.3. Efecto de la resolución espectral en el análisis visual	1
5.3.4. Interpretación de composiciones en color	1
5.3.5. Ejercicios de análisis multi-temporal	1
5.4. Aplicaciones del análisis visual	1
5.4.1. Cartografía geológica	1
5.4.2. Cobertura del suelo	1
5.4.3. Morfología urbana	1
6. Tratamiento digital de imágenes	
6.1. La matriz de datos en una imagen digital	2
6.2. Soporte y organización de la imagen	2
6.2.1. Soporte físico	2
6.2.2. Formato de grabación	2
6.3. Equipos de tratamiento digital de imágenes	2
6.3.1. Componentes físicos	2
6.3.1.1. Unidades de entrada de información.	2
6.3.1.2. Unidades de proceso y almacenamiento.	2
6.3.1.3. Unidades de salida	2
6.3.2. Componentes lógicos: Software	2
6.3.3. Equipos de tratamiento digital	2
6.3.3.1. Equipos basados en un ordenador personal	2
6.3.3.2. Equipos soportados por un ordenador PC	2
6.3.3.3. Equipos soportados por un mini-ordenador	2
6.4. Operaciones de utilidad general	2
6.4.1. Manipulación de ficheros	2

6.4.2. Cálculo de estadísticas e histograma de la imagen	234
6.4.3. Utilidades para la visualización	236
6.5. Correcciones de la imagen	238
6.5.1. Fuentes de error en una imagen espacial	239
6.5.2. Correcciones radiométricas	242
6.5.2.1. Restauración de líneas o pixels perdidos	242
6.5.2.2. Corrección del bandeo de la imagen	243
6.5.2.3. Corrección atmosférica	245
6.5.2.4. Conversión de ND a parámetros físicos	249
6.5.3. Correcciones geométricas	253
6.5.3.1. Establecimiento de puntos de control	254
6.5.3.2. Cálculo de las funciones de transformación	258
6.5.3.3. Transferencia de los ND originales a la posición corregida	262
6.5.3.4. Conveniencia de las correcciones geométricas	269
6.6. Realces y mejoras de la imagen	270
6.6.1. Ajuste del contraste	270
6.6.1.1. Necesidad del ajuste	270
6.6.1.2. Tablas de referencia del color	271
6.6.1.3. Compresión del contraste	273
6.6.1.4. Expansión del contraste	275
6.6.1.4.1. Expansión lineal	277
6.6.1.4.2. Ecuilibración del histograma	280
6.6.1.4.3. Expansión especial del contraste	282
6.6.2. Empleo del pseudo-color	285
6.6.3. Composiciones en color	287
6.6.4. Transformación HSI	288
6.6.5. Cambios de escala	293
6.6.6. Filtrajes	295
6.6.6.1. Naturaleza de un filtro digital	295
6.6.6.2. Filtros de paso bajo	299
6.6.6.3. Filtros de paso alto	301
6.7. Transformaciones de la imagen	304
6.7.1. Introducción	304
6.7.2. Cocientes e índices de vegetación	305
6.7.3. Componentes principales	310
6.7.4. Transformación 'Tasseled Cap' (TTC)	319
6.8. Clasificación digital	325
6.8.1. Conceptos previos	325
6.8.2. Fase de entrenamiento	329
6.8.2.1. Conceptos básicos	329
6.8.2.2. Método supervisado	332
6.8.2.3. Método no supervisado	336

6.8.2.4. Métodos mixtos	33
6.8.2.5. Análisis de las estadísticas de entrenamiento	33
6.8.3. Fase de asignación	33
6.8.3.1. Clasificador de mínima distancia	33
6.8.3.2. Clasificador de paralelepípedos	33
6.8.3.3. Clasificador de máxima probabilidad	33
6.8.3.3.1. Fundamento del método	33
6.8.3.3.2. Extensión a varias bandas	33
6.8.3.4. Otros criterios de asignación	33
6.8.3.4.1. Clasificadores en árbol	33
6.8.3.4.2. Clasificadores de contexto	33
6.8.3.4.3. Empleo de información auxiliar	33
6.8.3.4.4. Clasificación multi-temporal	33
6.9. Obtención y presentación de resultados	33
6.9.1. Productos cartográficos	33
6.9.1.1. Corrección cartográfica	33
6.9.1.2. Formación de una tabla de color	33
6.9.1.3. Suavización de los resultados	33
6.9.1.4. Reproducción de la imagen clasificada	33
6.9.2. Productos estadísticos	33
7. Verificación de resultados	
7.1. Fuentes de error en una clasificación temática	33
7.1.1. Estructura del territorio	33
7.1.2. Nivel de desagregación	33
7.1.3. Adquisición de la imagen	33
7.1.4. Condiciones medio-ambientales	33
7.2. Medidas de fiabilidad	33
7.3. Diseño del muestreo para la verificación	33
7.3.1. Tipos de muestreo	33
7.3.2. Tamaño de la muestra	33
7.4. La matriz de confusión	33
7.5. Análisis estadístico de la matriz de confusión	33
7.5.1. Medidas globales de fiabilidad	33
7.5.2. Fiabilidad del usuario y del productor	33
7.5.3. Aplicación del análisis categórico multivariante	33
8. Teledetección y Sistemas de Información Geográfica	
8.1. Necesidad de los SIG	33
8.2. Funciones de un SIG	33
8.2.1. Entrada de datos	40
8.2.2. Almacenamiento y organización de los datos	40
8.2.3. Análisis y transformaciones	40

8.2.4. Representación visual	408
8.3. Conexión entre la Teledetección y los SIG	409
8.4. Un ejemplo de conexión Teledetección-SIG	413
Apéndice I. Fuentes adicionales de Información	417
Apéndice II. Glosario	423
Bibliografía	431
Índice temático	451

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Componentes de un sistema de teledetección	26
Fig. 1.2 - Evolución histórica de los sistemas de teledetección	30
Fig. 1.3 - Imagen Landsat de la ciudad del Cairo	33
Fig. 1.4 - Aplicaciones de la teledetección espacial	40
Fig. 2.1 - Formas de teledetección	46
Fig. 2.2 - Esquema de una onda electro-magnética	47
Fig. 2.3 - Espectro electro-magnético	49
Fig. 2.4 - Diagrama de un ángulo sólido	52
Fig. 2.5 - Curva de emitancia radiativa de un cuerpo negro a distintas temperaturas	53
Fig. 2.6 - Curva de emitancia radiativa del Sol	57
Fig. 2.7 - Relación entre flujo incidente y reflejado	58
Fig. 2.8 - Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas	59
Fig. 2.9 - Superficies especulares y lambertianas	60
Fig. 2.10 - Factores que modifican la signatura espectral	62
Fig. 2.11 - Signatura espectral de la vegetación sana	64
Fig. 2.12 - Espectros de laboratorio para varios minerales	67
Fig. 2.13 - Relación entre contenido de clorofila en el agua y valores adquiridos por el sensor TM	69
Fig. 2.14 - Reflectividad característica para distintos tipos de nieve	70
Fig. 2.15 - Emisividad espectral de distintos cuerpos	71
Fig. 2.16 - Inercia térmica estimada para diversas cubiertas	73
Fig. 2.17 - Contrastes térmicos entre tierra y agua	75
Fig. 2.18 - Distintos tipos de retro-dispersión	78
Fig. 2.19 - Morfología del terreno a partir de imágenes rádar	80
Fig. 2.20 - Relación entre humedad del suelo y capacidad de penetración del rádar	82
Fig. 2.21 - Imagen rádar sobre la costa portuguesa	83
Fig. 2.22 - Transmisividad de la atmósfera a distintas longitudes de onda	84
Fig. 2.23 - Imagen Meteosat sobre la banda de absorción del vapor de agua	85
Fig. 2.24 - Dispersión atmosférica a distintas longitudes de onda	87
Fig. 3.1 - Efectos de la resolución espacial sobre la señal recogida por el sensor	92
Fig. 3.2 - Efectos de la resolución espectral en la discriminación de cubiertas	94

Fig. 3.3 - Relaciones entre resolución espacial, espectral y temporal para distintos sensores	
Fig. 3.4 - Cámara Multibanda MKF-6	
Fig. 3.5 - Fotografía del Skylab sobre el Estrecho de Gibraltar	
Fig. 3.6 - Par estereoscópico de la cámara métrica sobre los Picos de Urbión	
Fig. 3.7 - Fotografía de la Cámara de Gran Formato sobre el Sistema Central y Valle del Tajo	
Fig. 3.8 - Ampliación de la fotografía anterior sobre la ciudad de Madrid	
Fig. 3.9 - Diagrama de un explorador de barrido	
Fig. 3.10 - Diagrama de un explorador por empuje	
Fig. 3.11 - Diagrama de un sensor de vidicon	
Fig. 3.12 - Imagen Seasat centrada en la ciudad de Monforte de Lemos y río Miño	
Fig. 3.13 - Imagen SIR-A sobre el litoral alicantino	
Fig. 3.14 - Configuración de los primeros Landsat	
Fig. 3.15 - Configuración de los Landsat-4 y 5	
Fig. 3.16 - Antenas receptoras de imágenes Landsat	
Fig. 3.17 - Diagrama de adquisición de las cámaras RBV	
Fig. 3.18* - Imagen multispectral SPOT sobre el Estrecho de Gibraltar	
Fig. 3.19 - Sistema de adquisición de imágenes estereoscópicas del satélite SPOT	
Fig. 3.20* - Imagen del sensor AVHRR-NOAA sobre el continente europeo	
Fig. 3.21* - Imagen completa del satélite Meteosat	
Fig. 3.22* - Imagen del satélite indio IRS-1	
Fig. 4.1 - Bases para la elección del tratamiento de imágenes en trabajos de teledetección	
Fig. 4.2 - Aplicaciones más importantes de la teledetección	
Fig. 4.3 - Soporte de productos fotográficos	
Fig. 4.4 - Productos digitales ofrecidos por la empresa norteamericana EOSAT	
Fig. 4.5 - Ventajas e inconvenientes del análisis visual frente al digital en la interpretación de imágenes	
Fig. 4.6 - Tareas anejas a la interpretación de imágenes	
Fig. 4.7 - Fases que incluye un proyecto de orientación medio-ambiental	
Fig. 5.1 - Imagen Landsat de la costa portuguesa en el formato original de NASA	
Fig. 5.2 - Imagen Landsat de la zona centro en el formato original de la ESA	
Fig. 5.3 - Imagen Landsat en el formato actual de ESA	
Fig. 5.4a - Imagen MSS sobre la zona centro	
Fig. 5.4b - Croquis cartográfico de la misma zona	
Fig. 5.5 - Tono y signaturas espectrales	
Fig. 5.6 - Formación del color en imágenes multispectrales	
Fig. 5.7* - Composición coloreada del sector urbano de Madrid	
Fig. 5.8 - Procesos de formación del color	
Fig. 5.9 - Diagramas de textura	
Fig. 5.10 - Dimensiones temporales en la interpretación de imágenes	
Fig. 5.11 - Efectos de la resolución espacial: imágenes MSS y TM sobre Madrid	

Fig. 5.12 - Efecto de la resolución espectral: bandas 1 a 6 de la imagen TM	172
Fig. 5.13* - Imagen TM en falso color de la zona centro adquirida en época estival	194
Fig. 5.14* - Imagen TM en falso color adquirida en primavera	195
Fig. 5.15 - Dimensión multi-estacional en la interpretación de imágenes: adquisiciones de enero, mayo, julio y octubre sobre la zona centro.	177
Fig. 5.16 - Dimensión multi-anual: imágenes RBV (1980) y TM (1984) sobre la ciudad de Madrid	181
Fig. 5.17 - Mapa de lineamientos a partir de análisis de imágenes	184
Fig. 5.18 - Criterios para la interpretación visual de imágenes	187
Fig. 5.19* - Imagen TM del centro urbano de Madrid	196
Fig. 6.1 - Organización de una imagen digital	206
Fig. 6.2 - Formatos de grabación	210
Fig. 6.3 - Flujo de información en un ordenador	212
Fig. 6.4 - Equipo de digitización	214
Fig. 6.5 - Ejemplo de salidas gráficas con sistemas de bajo coste: impresora matricial, chorro de tinta y láser	220
Fig. 6.6 - Relaciones entre hardware, sistema operativo y programas de usuario	223
Fig. 6.7 - Componentes de un equipo de tratamiento digital de imágenes	228
Fig. 6.8 - Mapa de zona de estudio	231
Fig. 6.9 - Aislamiento de la zona urbana mediante máscaras	233
Fig. 6.10 - Histogramas de cuatro bandas correspondientes a la imagen de Madrid	237
Fig. 6.11 - Fuentes de error geométrico en una imagen espacial	240
Fig. 6.12 - Histograma de los distintos detectores para la corrección del bandeado	245
Fig. 6.13 - Corrección atmosférica por el método del valor mínimo	248
Fig. 6.14* - Efecto de la corrección atmosférica sobre la composición en color natural	197
Fig. 6.15 - Conversión de ND a valores de reflectividad	251
Fig. 6.16 - Fases del proceso de corrección geométrica	255
Fig. 6.17 - Puntos de control seleccionados para la corrección de la imagen de Madrid	259
Fig. 6.18 - Ejemplos de transformación geométrica de la imagen	261
Fig. 6.19 - Efecto del algoritmo de transferencia en la corrección geométrica	264
Fig. 6.20 - Corrección digital con distintos algoritmos de interpolación	266
Fig. 6.21 - Imagen corregida (banda 4)	268
Fig. 6.22 - Estructura y representación gráfica de una CLUT	272
Fig. 6.23* - Composición en falso color de la imagen de Madrid	198
Fig. 6.24* - Representación de la figura anterior con compresión de colores	198
Fig. 6.25 - Imagen original (banda 2)	276
Fig. 6.26 - Imagen realzada con expansión lineal del contraste	278
Fig. 6.27 - Histograma y CLUT para la imagen realzada	279
Fig. 6.28 - Imagen realzada mediante equalización del histograma	281
Fig. 6.29 - Histograma y CLUT para la imagen realzada	282
Fig. 6.30 - Imagen realzada mediante expansión especial sobre el rango de las áreas forestales	284
Fig. 6.31 - Histograma y CLUT para la imagen realzada	285

Fig. 6.32 - Representación gráfica del color a partir de las coordenadas RGB y HSI	
Fig. 6.33 - Imagen del Tono, Saturación e Intensidad	
Fig. 6.34* - Composición a partir de los componentes HSI	
Fig. 6.35 - Efecto de los cambios de escala	
Fig. 6.36 - Imagen de Madrid con distintos niveles de magnificación	
Fig. 6.37 - Ejemplo de filtraje digital	
Fig. 6.38 - Filtro de paso bajo sobre la imagen de Madrid	
Fig. 6.39 - Filtro de paso alto sobre la imagen de Madrid	
Fig. 6.40 - Efecto de filtros direccionales	
Fig. 6.41 - Fundamento espectral de los índices de vegetación	
Fig. 6.42* - Imagen cociente entre el infrarrojo cercano y rojo	
Fig. 6.43 - Empleo del cociente de bandas para reducir el efecto de contraste topográfico	
Fig. 6.44 - Diagrama sobre la obtención de Componentes Principales	
Fig. 6.45 - Componentes Principales de la imagen de Madrid	
Fig. 6.46* - Composición coloreada con los tres primeros CP de la imagen de Madrid	
Fig. 6.47 - Fundamento de la transformación <i>Tasseled Cap</i>	
Fig. 6.48 - Planos de variación en una transformación TC	
Fig. 6.49 - Componentes TC sobre la imagen de Madrid	
Fig. 6.50* - Composición en color a partir de la TTC	
Fig. 6.51 - Fundamentos de la clasificación digital	
Fig. 6.52 - Relaciones entre clases informaciones y espectrales	
Fig. 6.53 - Problemas en la selección de los campos de entrenamiento	
Fig. 6.54 - Fundamentos del análisis no supervisado	
Fig. 6.55 - Diagrama de firmas espectrales para las cubiertas que intervienen en la clasificación	
Fig. 6.56 - Diagrama de confusión espectral entre cubiertas	
Fig. 6.57 - Representación de las clases como distribuciones normales	
Fig. 6.58 - Funciones discriminantes para la asignación digital	
Fig. 6.59 - Algoritmo de mínima distancia	
Fig. 6.60 - Algoritmo de paralelepípedos	
Fig. 6.61 - Fundamentos del algoritmo de máxima probabilidad	
Fig. 6.62 - Efecto de considerar la probabilidad a priori	
Fig. 6.63 - Extensión a dos bandas del algoritmo	
Fig. 6.64 - Efecto de considerar la probabilidad a posteriori	
Fig. 6.65* - Clasificación supervisada	2
Fig. 6.66* - Clasificación no supervisada	2
Fig. 6.67 - Ejemplo de clasificación en árbol	
Fig. 6.68 - Imagen de textura a partir de la banda 2	
Fig. 6.69 - Filtros de suavizamiento clasificación de la imagen de Madrid	
Fig. 6.70* - Efecto de un filtro para el suavizado de resultados	2
Fig. 7.1 - Consecuencias del error de frontera	3
Fig. 7.2 - Efecto de contraste radiométrico entre cubiertas vecinas	3

Fig. 7.3 - Distribución espacial del error en las clasificaciones	379
Fig. 7.4 - Medidas de la fiabilidad	382
Fig. 7.5 - Tipos de muestreo aplicados a la verificación	384
Fig. 7.6 - Diagrama del muestreo sistemático no alineado	386
Fig. 8.1 - Clasificación y S.I.G.	398
Fig. 8.2 - Módulos de un S.I.G.	400
Fig. 8.3 - Estructuras de almacenamiento de datos	403
Fig. 8.4 - Necesidades de almacenamiento en estructuras vectoriales y teselares	404
Fig. 8.5 - Resolución y estructuras de almacenamiento	405
Fig. 8.6 - Análisis de proximidad a partir de estructuras vectoriales y teselares	406
Fig. 8.7 - Superposición de variables a partir de estructuras vectoriales y teselares	408
Fig. 8.8 - Representación gráfica de variables en un S.I.G.	410
Fig. 8.9 - Conexión entre la teledetección y los S.I.G.	412
Fig. 8.10* - Clasificación digital de la imagen de Oropesa	204
Fig. 8.11* - Perspectiva tridimensional de la superficie afectada por el incendio	204
Fig. 8.12 - Superposición de áreas de riesgo a partir de carreteras y pistas forestales	415

A mis queridos padres

PRÓLOGO

La publicación en castellano de un tratado de Fundamentos de Teledetección tiene en el momento actual un valor y alcance elevado. Se trata de la primera obra sobre un tema que se inscribe en el campo de las Ciencias de la Tierra, en el que están interesados profesionales muy variados: geógrafos, geólogos, biólogos, oceanógrafos y expertos relacionados con los problemas agrícolas, forestales y la ordenación del territorio. El texto está destinado a cursos que se impartan a nivel universitario y su objetivo está definido claramente por el autor: "facilitar a todos los interesados en el estudio del medio ambiente el acceso a una técnica que puede serles fructífera en la comprensión de los fenómenos que estudian".

Desde hace veinte años varios centros y grupos universitarios españoles han venido trabajando en diversas aplicaciones de la teledetección espacial. Al entrar en la década de los 90, el interés por esta técnica ha crecido notablemente. La abundante información que generan los programas espaciales y su mayor detalle, que amplía sus campos de aplicación, y el creciente número de expertos que hacen uso más frecuente de esta tecnología, son circunstancias muy propicias para el desarrollo de la teledetección.

Este interés por esta técnica se refleja en los numerosos coloquios, seminarios, conferencias y participación española en programas internacionales relacionados con diversas aplicaciones de esta disciplina. Toda esta actividad se traduce en la publicación de monografías, ponencias y trabajos de investigación. Sin embargo, hasta ahora no disponíamos de un manual que, de forma clara y concisa, respondiese a un programa de introducción a la teledetección, exponiendo con rigor y de forma práctica la técnica de la interpretación y tratamiento de imágenes espaciales. En este contexto, el profesor Chuvieco presenta una obra, escrita de forma sobria y directa, que viene a rellenar un hueco, inconcebiblemente vacío hasta ahora, en nuestra bibliografía científica.

El libro se articula en ocho capítulos. En el primero el autor, después de una breve descripción de los antecedentes históricos de esta tecnología, presenta los aspectos legales y la evolución del Derecho espacial, en lo que afecta a las actividades de la teledetección. Sigue el autor presentando los fundamentos físicos del proceso de obtención de los datos desde los principales sensores espaciales. Hay que agradecer la reducción del aparato físico matemático al mínimo, en aras de la soltura y agilidad del texto; no cae el autor en la farragosidad que, desgraciadamente, suele acompañar a este tipo de obras.

El tercer capítulo trata los sistemas espaciales: sensores y plataformas. Se hace una presentación sencilla, casi informativa, con el fin de no agobiar al lector con técnicas innecesarias para un aspirante a interpretar y tratar imágenes espaciales.

En el cuarto se dan los principios para la interpretación de imágenes y a partir de él, comenta el autor, "se desarrolla el núcleo central del libro". El capítulo siguiente se dedica al análisis visual de imágenes, que puede servir de recordatorio, en algunas partes, a los que hayan seguido un curso de foto-interpretación. No obstante, alcanza un gran valor la síntesis que se hace de los criterios a tener en cuenta por usuarios en el manejo de este tipo de documentación.

De esta forma se llega al capítulo sexto que es, en mi opinión, el más importante, ya que el lector que disponga de una formación básica en estadística e informática puede adquirir sin esfuerzo unos conocimientos buenos y prácticos sobre el tratamiento digital de imágenes. Se estudian las correcciones radiométricas y geométricas, los reales y mejoras de la imagen, las transformaciones y distintos tipos de clasificación. Los científicos que trabajan en temas espaciales encontrarán un excelente resumen, muy actualizado, donde situar su propia investigación. Todos los aspectos tratados son claves para el correcto proceder en el uso de esta técnica, su ilustración, con numerosos ejemplos, llena de vida este apartado del que el lector obtiene una idea muy clara de las posibilidades reales del tratamiento digital de imágenes espaciales.

En el capítulo séptimo se trata -muy pocos textos lo hacen-, de la verificación de las clasificaciones. En el último capítulo, se estudia la integración de la información espacial en Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de referenciarla geográficamente y hacerla más inteligible al usuario que desea disponer de información temática estadística y gráfica.

Como resumen podemos decir que el material presentado facilita a los lectores las bases necesarias para introducirse en el campo de la teledetección espacial. *Fundamentos de Teledetección Espacial* está destinado a prestar un servicio importante. El autor ha realizado un gran esfuerzo para llegar al mayor número de lectores. Creo que Emilio

Chuvieco ha logrado su propósito y aumentará, no lo dudo, el número de estudiosos de las Ciencias de la Tierra, que se introducirán, gracias a esta obra, en el fascinante campo de la interpretación de las imágenes espaciales. La observación de la Tierra desde el espacio nos ayudará a conservarla y mejorarla, y también explotar de forma más racional los recursos que nos ofrece.

Madrid, Abril de 1990

RODOLFO NÚÑEZ DE LAS CUEVAS
Prof. Dr. Ingeniero Geógrafo
Presidente de la Sociedad Española de
Cartografía, Fotogrametría y Teledetección

PRESENTACION

Mi primer contacto con la teledetección surgió en una conversación callejera con mi buen amigo Juan Antonio Cebrián, enfrascado en aquellos años en tareas de cartografía asistida por ordenador. Me habló entonces de una nueva técnica, que a su juicio sería de gran trascendencia para un mejor conocimiento y conservación de los recursos de nuestro frágil planeta. Gracias a su consejo, y al refrendo de una beca en el Instituto de Geografía Aplicada del CSIC, inicié los trabajos de mi tesis doctoral, hace ahora ocho años. Desde entonces hasta el momento presente me he dedicado, casi exclusivamente, al estudio de esta técnica creciendo progresivamente mi interés por su conocimiento, ante el amplio panorama de sus aplicaciones medio ambientales.

A muchos parecerá un tanto pretencioso redactar un tratado con tan breve periodo de formación. Posiblemente no les falte razón, si bien conviene señalar que esta obra se ha escrito no desde la perspectiva de quien ha llegado a una cúspide, sino más bien del aprendiz en camino que intenta evitar a otros sus propios trompicones.

El título incluye la palabra Fundamentos bien a propósito. No se pretende agotar la técnica; antes al contrario, iniciar su estudio, allanar el sendero de quienes contemplen en ella una nueva fuente de información sobre el espacio que nos rodea. Por esta razón, el texto se centra sobre los aspectos de interpretación, dejando las aplicaciones para un futuro volumen.

Con objeto de facilitar la lectura se han adoptado una serie de convenciones en la notación que incluye el texto. Las fórmulas se citan entre corchetes [] con dos números: el primero hace referencia al capítulo en donde se incluye y el segundo al orden dentro de ese capítulo. De forma similar se citan las figuras, entre paréntesis () y precedidas de la indicación fig., también con dos números. Aquellas que aparecen con un asterisco * indican fotografías en color, y están situadas en el encarte central del libro. Por último, en ocasiones se sugiere al lector acudir a otros capítulos para recabar información adicional. Esto se hará indicando la numeración de ese capítulo entre paréntesis (). Al final de la obra, se han incluido un glosario de términos y un índice temático, que ayudarán al lector a asimilar su contenido.

Esta, como cualquier otra obra universitaria, no es labor exclusiva de quien la firma. La aportación de algunas personas e instituciones resulta tan destacada, que sería injusto omitir su referencia en estos párrafos. En primer lugar, es de justicia recordar a quienes contribuyeron directamente a mi formación en este campo. El centro de investigación UAM-IBM me acogió con todo interés en mis primeras, y torpes, andaduras. Después fué el Instituto de Geografía Aplicada del CSIC, la Universidad de California en Berkeley, y la Universidad de Nottingham. En estas instituciones, el apoyo de los profesores Casas Torres, Núñez de las Cuevas, Ortí, Ramírez, Congalton y Mather ha sido muy destacado. A ellos hay que sumar las sugerencias de Victoriano Moreno, Julio Uboldi, Vicente Caselles, Joaquín Meliá y Javier Martínez Vega, que han contribuido sustancialmente a mejorar la calidad final del texto. En los aspectos materiales, merecen especial mención Fernando Moreno, autor de buena parte de las fotografías, Enrique Gaetner y Javier Salas.

Junto a las aportaciones de estos profesionales, también resulta obligado mencionar el papel que juegan, en la gestación y desarrollo de este trabajo, mis propios alumnos. Como profesor universitario, los alumnos son la razón última de estas páginas y marcan su orientación didáctica. La actividad docente en los cursos del programa de Doctorado, que imparte nuestro Departamento, ha permitido limar muchos conceptos, hacerlos más asequibles. En mi opinión, los especialistas caemos con bastante frecuencia en un prurito academicista, que -en aras de un rigorismo científico- sacrifica la claridad y didáctica de los contenidos, dificultando, en última instancia, su acceso a los neófitos. Espero no haber incurrido en esta postura, ya que la función principal de este libro es la enseñanza de la teledetección, a distintos niveles y en diversos ámbitos científicos, tanto en España como en los queridos países latinoamericanos.

Mi agradecimiento también a la editorial Rialp, que acogió de buen gusto la idea de llevar a cabo este volumen, mostrando en todo momento gran interés por su desarrollo.

No puedo concluir estos párrafos, sin hacer especial mención al Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, donde he trabajado en los últimos cinco años, y en donde siempre he encontrado un estímulo intelectual y un entorno de sincera camaradería. Buena parte de ese inestimable ambiente se debe a su director, el profesor Sancho Comins, modelo del hacer, del hacer hacer, y del dejar hacer. A él se deben buena parte de las cualidades que pueda contener esta obra.

Alcalá de Henares, Mayo de 1990

EMILIO CHUVIECO SALINERO

1. NOCIONES INTRODUCTORIAS

1.1. DEFINICIÓN Y OBJETIVOS

Volar ha sido, desde épocas muy remotas, uno de los sueños más intensamente anhelados por la Humanidad. Pese a la persistencia de intento, sólo en fechas recientes el hombre ha dispuesto de los medios técnicos necesarios para hacer realidad este deseo. Desde ese momento el ritmo de la innovación tecnológica ha sido vertiginoso, lo que nos ha permitido enriquecer notablemente nuestro conocimiento sobre el Planeta y sus habitantes.

Uno de los principales acicates de esta aventura aérea ha sido la búsqueda de una nueva visión de los paisajes terrestres. El afán de remontar la limitada perspectiva de la visión humana es evidente y desde los inicios de la aeronáutica, llegando a ser, hoy en día, una pieza clave de la investigación espacial.

Esa observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. Este vocablo es una traducción latina de término inglés *remote sensing*, ideado a principios de los 60 para designar cualquier medio de observación remota, si bien se aplicó fundamentalmente a la fotografía aérea, principal sensor de aquel momento. En sentido amplio -y así se tratará en este libro-, la teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación. En esta obra se restringe el análisis a aquellos medios de teledetección montados sobre plataformas espaciales, de ahí el adjetivo que completa el título. Queda relegada, por tanto, la fotografía aérea clásica, para centrarnos en el estudio de técnicas más recientes de observación terrestre.

Esto no implica, en modo alguno, un menosprecio hacia la fotografía aérea, que sigue siendo la técnica de teledetección más empleada, y es en muchos casos, un auxiliar imprescindible para estos medios de

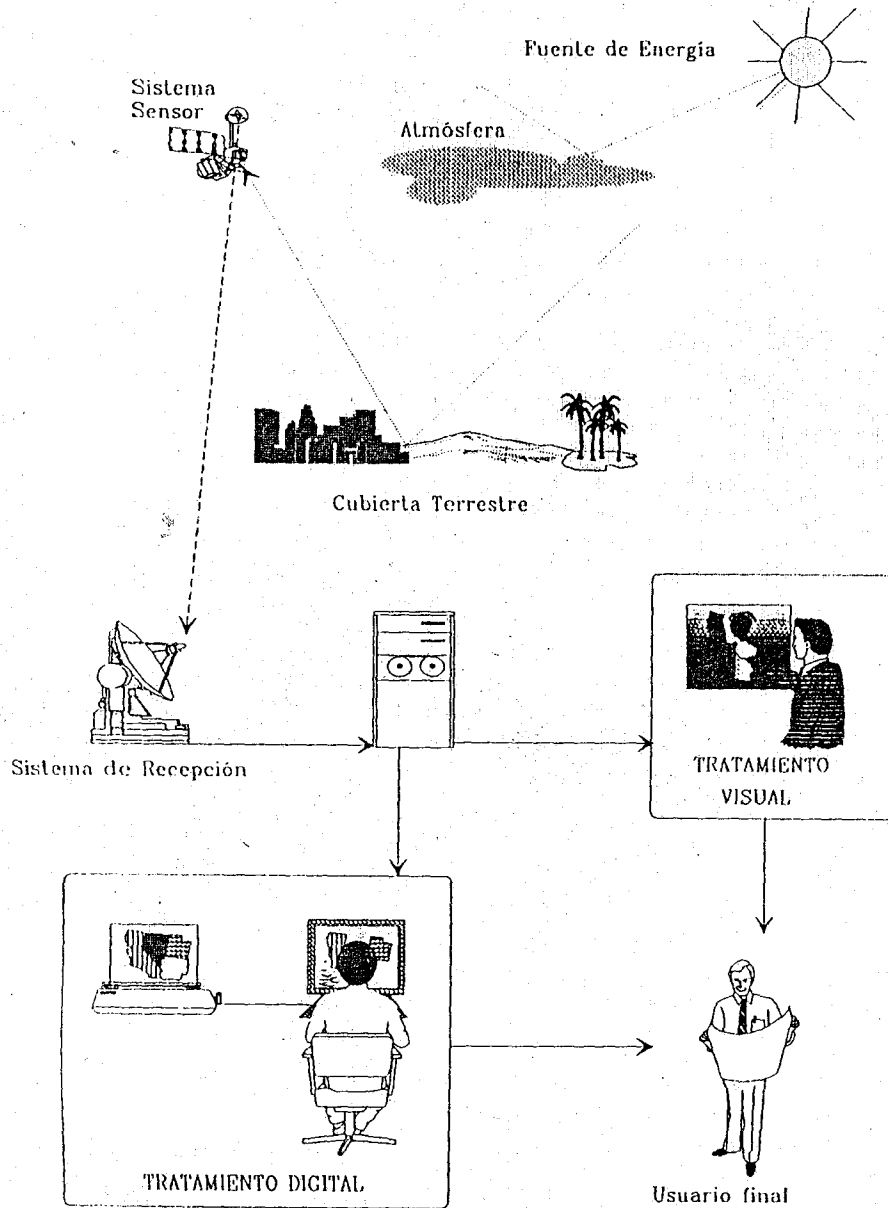


Fig. 1.1 - Componentes de un sistema de teledetección

observación espacial. Se asume, no obstante, que el lector está familiarizado con las técnicas de foto-interpretación, ya que ha venido siendo materia común en la mayor parte de las facultades con orientación medio ambiental. De esta forma, podremos centrarnos en los nuevos medios de teledetección, aún carentes de suficiente bibliografía en nuestra lengua, en contraste con el gran interés que suscitan entre diversos expertos en ciencias de la Tierra: geógrafos, biólogos, edafólogos, forestales, agrónomos, oceanógrafos o cartógrafos, hacia quienes esta obra va dirigida.

Si hemos definido la teledetección espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una determinada aplicación. Como antes comentamos, ese análisis de la información recibida se incluye también -en sentido amplio- dentro del estudio de la teledetección, aunque esté más allá de los procesos de adquisición propiamente dichos. No obstante, constituye un capítulo fundamental para nuestros intereses, por cuanto esta obra se dirige más a presentar los fundamentos para las distintas aplicaciones, que los aspectos técnicos en sí mismo considerados.

En definitiva, un sistema de teledetección espacial, tal y como se concibe en la presente obra, incluye los siguientes elementos (fig. 1.1):

(i) Fuente de energía, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste (teledetección activa). La fuente de energía más importante, obviamente, es la energía solar.

(ii) Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de (i), y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

(iii) Sistema sensor, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

(iv) Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato

apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.

(v) Intérprete, que analiza esa información -normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales-, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.

(vi) Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

El símil de la visión humana puede ayudar a entender el significado de estos componentes. El ojo humano (iii) recibe un haz energético procedente de los objetos exteriores (ii) por reflejo de la luz solar (i). Esa señal se transmite al cerebro (iv), que es capaz de formar una serie de imágenes sobre el mundo real que le circunda. El individuo que observa es a la vez intérprete (v) y usuario final (vi) de la imagen detectada, lo que le permite tomar decisiones sobre su propio comportamiento. En otras palabras, la visión humana forma un sistema de teledetección, muy sofisticado por cierto, puesto que nos permite caracterizar con mucho detalle los objetos que observamos.

Sin embargo, nuestra percepción visual presenta también algunas limitaciones. Por un lado, se restringe por la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, que sólo nos permiten apreciar un determinado tipo de energía, denominado, por esa razón, espectro visible. Otras formas energéticas, como el calor, no nos son directamente perceptibles, por lo que parece conveniente contar con unos "ojos artificiales" que amplíen nuestras propias posibilidades. Otra restricción de la visión humana hace referencia a la perspectiva de observación. El campo de visión del hombre está limitado a su propia estatura, o a la que puede adquirir desde observatorios naturales. En cualquier caso, se trata de una perspectiva oblicua, y de pequeño radio de acción, lo que dificulta observar fenómenos muy extendidos como inundaciones o incendios, donde las estimaciones directas son siempre imprecisas. Para paliar ambas limitaciones, el hombre ha acudido a sensores artificiales, montados sobre plataformas situadas a una cierta altitud. Con ellos, se tiene acceso a tipos de energía no visibles (ultravioleta, infrarojo, micro-ondas), y, además, desde una nueva perspectiva, vertical y panorámica. Esta nueva información expande notablemente nuestro conocimiento del medio que nos rodea, facilitando nuestra interpretación de los múltiples procesos que afectan al Planeta.

El creciente empleo de distintos sensores de observación terrestre está originando no sólo una enorme cantidad de información, sino también

una nueva forma de estudiar la superficie terrestre. La teledetección junto a las técnicas anejas de almacenamiento y proceso de la información geográfica, permiten disponer de una masa ingente de dato sobre el territorio, algunos de ellos accesibles en tiempo real. Para aprovechar con fruto estas técnicas, el recurso a los ordenadores electrónicos resulta casi inevitable. Una vez salvado el necesario entrenamiento, estos equipos amplían notablemente nuestra capacidad de análisis: ayudan a elaborar una interpretación rápida y económica de problema bajo estudio, a la vez que permiten abordar análisis integrados difícilmente viables con otros medios tradicionales. En definitiva, gracias a estos recursos, podemos cada día poner más el énfasis sobre el planteamiento de modelos y el análisis de resultados -tareas éstas donde la inteligencia humana resulta insustituible-, librándola de otras labores mecánicas (acopio y ordenación de datos), que han consumido tradicionalmente las mejores fuerzas del investigador.

De acuerdo con el esquema antes enunciado, esta obra engloba el estudio de los distintos elementos que forman un sistema de teledetección. En primer lugar, se analizan los procesos que permiten obtener las imágenes espaciales: principios físicos de transmisión de la energía (cap. 2), y técnicas de adquisición de imágenes, con un breve repaso de los principales proyectos de observación terrestre (cap. 3). El resto de los capítulos se centran en la interpretación -tanto visual como digital- de las imágenes, punto crucial para los interesados en las aplicaciones de esta técnica (cap. 4 a 6). La verificación de los resultados obtenidos en esa fase se aborda en el capítulo 7, para concluir la obra con un capítulo a modo de epílogo, dedicado al estudio de la conexión entre la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, dentro de un planteamiento integrado del análisis medio ambiental. Estos capítulos preceden por unos comentarios sobre el pasado, presente y desarrollo previsible de la teledetección, incluyendo algunos aspectos legales que pueden ayudar a enmarcar conflictos internacionales derivados de esta observación terrestre.

1.2. UN POCO DE HISTORIA

La teledetección es una técnica aplicada, y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento. Por cuanto que en ella se conjugan aspectos muy variados -óptica y detectores del sensor, vehículo que lo sustenta, sistemas de transmisión, equipos de tratamiento, etc-, las formas de teledetección han variado ostensiblemente en las últimas décadas (fig. 1.2). El crecimiento ha sido

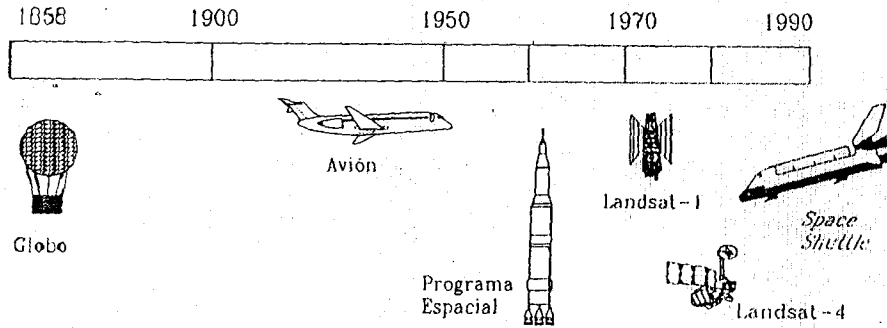


Fig. 1.2 - Evolución histórica de los sistemas de teledetección

realmente vertiginoso, facilitando una progresión muy notable, tanto en la cantidad, como en la variedad y calidad de la información disponible para campos científicos muy variados.

Las primeras experiencias de teledetección se remontan a 1859, cuando Gaspar Felix de Tournachon obtiene las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo (Hyatt, 1988). Al año siguiente, James Wallace repite la experiencia sobre la ciudad de Boston, poniéndose en evidencia el interés de la nueva perspectiva aérea para un conocimiento más detallado de la organización urbana.

En los años siguientes, se asiste a un importante desarrollo de la observación fotográfica desde avión, gracias a los importantes progresos realizados en ópticas y emulsiones. En 1909, Wilbur Wright adquiere la primera fotografía aérea, abriendo el camino a una larga historia de observación desde plataformas remotas. La primera cámara aérea propiamente dicha se desarrolla durante el primer conflicto bélico, concretamente en 1915, por J.T.C. Moore-Brabazon. La importancia estratégica de este escrutinio queda pronto en evidencia, desarrollándose notablemente las técnicas de adquisición y procesado fotográfico (Brookes, 1975).

Será, no obstante, en la Segunda Guerra Mundial cuando se produzca un notable desarrollo de las técnicas de teledetección aérea. El progreso se orienta a mejorar la óptica de las cámaras de reconocimiento, así como las emulsiones utilizadas (de esta época proceden las primeras películas en infrarrojo, desarrolladas por Kodak Research Laboratories). Asimismo, se introducen nuevos sensores, como el radar, y se mejoran los

sistemas de comunicación. Por otro lado, la aeronáutica prospera notablemente, lo que confiere mayor estabilidad a las plataformas de observación.

Todas estas innovaciones se aplican posteriormente a usos civiles, lo que muestra las múltiples aplicaciones de esta exploración aérea para el mejor conocimiento y control de los recursos naturales. En los años de posguerra se mejoran los sistemas radar, introduciendo el radar lateral aerotransportado (SLAR), y se ponen a punto los sensores térmicos de barrido.

A finales de los años 50, el desarrollo de los sistemas de navegación permite concebir los primeros ingenios espaciales. La denominada "guerra fría" tiene en el espacio uno de sus objetivos preferentes, alentándose desde uno y otro bando, una intensa investigación en estos temas. Al lanzamiento del satélite soviético Sputnik, en 1957, le siguen una larga serie de misiones civiles y militares, que han permitido no sólo la exploración de nuestro Planeta, sino también de la Luna y los planetas vecinos.

Poco después de iniciarse esta "carrera espacial", se pone en evidencia el interés de usar estas plataformas para adquirir valiosos datos de la superficie y atmósfera terrestre. En 1960, la NASA pone en órbita el primer satélite de la serie TIROS, pionero de múltiples misiones de observación meteorológica, que han permitido un conocimiento y control más ajustados de las condiciones atmosféricas, evitando, o paliando, los efectos de las graves catástrofes naturales.

Junto a estos satélites artificiales, en los años sesenta también se impulsaron misiones tripuladas, dedicadas a la exploración del Sistema Solar y la conquista de la Luna. Además de estos fines, aportaron asimismo valiosas imágenes sobre la superficie terrestre, que sirvieron como base para planear proyectos dedicados exclusivamente a esta finalidad. Las primeras fotografías espaciales se tomaron por Alan B. Shepard, de forma espontánea y un tanto rudimentaria, durante una de las misiones del Mercury (1961). En los años siguientes, se continuaron tomando fotografías desde naves tripuladas, aunque será la misión Gemini-Titán (1965) la que incluya los primeros experimentos formales de fotografía espacial, en este caso para usos geológicos y meteorológicos (experimentos S005 y S006, respectivamente).

Alentada por los brillantes resultados de estos ensayos, la NASA continúa proyectando este tipo de observaciones. Durante las misiones

del Apollo-6 y Apollo-7 se adquieren diversas series de fotografías verticales, mientras en la del Apollo-9 (1969) se aborda el primer experimento multi-espectral, denominado S065, compuesto por cuatro cámaras Hasselblad con distintos filtros.

Todas estas experiencias, junto al bagaje aportado por los satélites meteorológicos, hacen concebir a la NASA proyectos dedicados exclusivamente a la cartografía y evaluación de los recursos naturales. El 23 de julio de 1972 supone la culminación de esta tendencia, con el feliz lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*). Este proyecto, bautizado Landsat con la puesta en órbita del segundo satélite en 1975, resulta el más fructífero hasta el momento para aplicaciones civiles de la teledetección (3.5.1). A partir de la serie Landsat, el interés de la comunidad científica internacional por esta técnica ha crecido exponencialmente, contándose por miles los estudios desarrollados -en muy variados países del mundo- sobre las imágenes proporcionadas por estos satélites (fig. 1.3).

A la serie Landsat seguirán otros proyectos específicamente diseñados para la observación medio ambiental. Los más conocidos son el laboratorio espacial tripulado Skylab (1973), el satélite oceanográfico Seasat (1978), el de investigación térmica HCMM (1978) -todos ellos propiedad de NASA-, el satélite francés SPOT (1986), el japonés MOS-1 (1987), el indio IRS-1 (1988), y los rusos Soyuz y Salut. Actualmente están muy avanzados los proyectos del satélite europeo ERS-1 y el canadiense Radarsat, lo que indica el interés que esta técnica suscita en muy variados contextos. Mención aparte merecen las numerosas misiones del transbordador espacial norteamericano (*Space Shuttle*) que ha revitalizado el papel de los sensores fotográficos. Las experiencias con cámaras de alta resolución (cámara métrica y cámara de gran formato), no pueden ser más alentadoras (3.3.1).

1.3. DESARROLLO ACTUAL

Pese a la juventud de esta tecnología, son ya numerosos los centros de producción, enseñanza e investigación que trabajan activamente en este campo. Las tendencias presentes parecen confirmar un creciente desarrollo de su aplicación, tanto en países desarrollados como en aquellos con una situación tecnológica más deficiente.

De acuerdo con Curran (1985), podemos distinguir cuatro estadios en el desarrollo de cualquier disciplina. El primero vendría dado por un



Fig. 1.3 - Imagen Landsat de la ciudad del Cairo (Cortesía EOSAT)

período preliminar de crecimiento, con una tradición investigadora escasa, y pocas o ninguna asociación dedicada a su estudio. El segundo, corresponde a un período de crecimiento exponencial, doblándose el número de publicaciones a intervalos regulares, a la vez que se establecen unidades de investigación. En el tercer nivel, el índice de crecimiento comienza a declinar y, aunque no existan importantes aumentos en el volumen de especialistas, el nivel de especialización y controversia aumenta. El último período se caracteriza por un nivel de crecimiento cercano a cero: las unidades de especialización y sociedades profesionales se consolidan y la ciencia adquiere madurez.

Dentro de este esquema, la teledetección ocupa estadios muy diversos según los países. "En la mayor parte de los países en desarrollo se

encuentran en el primer nivel, la mayor parte de los países europeos en el segundo, y Estados Unidos comienza a entrar en el tercer estadio" (Curran, 1985, p. 7).

Parece razonable pensar que nuestro país seguirá esta misma trayectoria, por lo que el análisis de la situación en Estados Unidos puede arrojar luces sobre las tendencias futuras¹. De acuerdo a un informe sobre la privatización del proyecto Landsat remitido al Congreso de Estados Unidos (OTA, 1984), existían en ese país a principios de los 80, más de 50 organizaciones comerciales dedicadas al empleo de la teledetección espacial. En más de 18 Estados se utilizaban datos Landsat para la construcción de sus sistemas de información territorial, y sólo en 2 no se habían constatado estudios realizados a partir de imágenes de este satélite. Con datos de 1977, este mismo informe registraba 590 profesores e investigadores universitarios trabajando en teledetección. En ese mismo año se ofrecían 137 cursos sobre esta técnica en universidades americanas, con un total de 2.906 inscritos. La situación actual supera con creces estos números, cifrándose en 549 los cursos ofrecidos en teledetección por más de 300 departamentos de 125 universidades (Kiefer, 1989)². Entre 1964 y 1984 se desarrollaron un total de 359 tesis doctorales sobre la materia, lo que da idea del importante desarrollo de la investigación en esta línea (Merideth y Sacks, 1986).

En cuanto a actividades profesionales, la mayor parte de las iniciativas se canalizan a través de la *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, que cuenta con más de 6.000 afiliados, divididos en 23 regiones y 5 divisiones de aplicación. Esta asociación publica mensualmente la revista *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, una de las más prestigiosas en este campo. Otras instituciones de gran actividad son los diversos centros NASA (especialmente el centro espacial *Goddard*, en Maryland, y el *Ames Research Center* y *Jet Propulsion Laboratory* en California). Entre los departamentos universitarios, cuenta con gran tradición el *Environmental Research Institute of Michigan* (ERIM), el *Laboratory for Applications of Remote Sensing* (LARS) de la Universidad de Purdue (Indiana), el *Institute for Environmental Studies*

¹ Una información más completa sobre las actividades de teledetección en distintos países puede obtenerse en: Carter (1986), Cracknell y Hayes (1986), y Hyatt (1988). Una relación de algunas entidades citadas en este epígrafe puede consultarse en el apéndice I.

² Jensen y Dahlberg (1983) cifraban en 691 los cursos de teledetección ofrecidos en universidades americanas, incluyendo los relativos a fotografía aérea, más del 80 % de los cuales se dictaban en universidades públicas. Los departamentos más activos, en esta docencia, eran los de Geografía (36 %), Geología (14,8 %) e Ingeniería Civil (8 %).

de la Universidad de Wisconsin-Madison, y la *Remote Sensing Unit* de la Universidad de California en Santa Barbara, por citar sólo los más significativos. Desde el punto de vista comercial, la empresa EOSAT se encarga actualmente de la distribución de los productos Landsat, con apoyo de algunos centros gubernamentales, como el *EROS Data Center*, NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para mantener la red de estaciones receptoras.

En Canadá la situación también es muy favorable, contando con una institución nacional, el *Canadian Center for Remote Sensing*, que cuenta con diversos centros regionales y coordina la actividad docente e investigadora en teledetección. También en este país ejerce su actividad una sociedad profesional, la *Canadian Remote Sensing Society*, dedicada a la organización de congresos periódicos y la publicación de una interesante revista, la *Canadian Journal of Remote Sensing*.

En el contexto europeo, tal vez el Reino Unido ha sido el país más interesado hasta el momento por la investigación aplicada en esta técnica. Pueden citarse cincuenta instituciones que estén trabajando activamente sobre ella (Bullard y Dixon, 1985), con una producción bibliográfica muy significativa: varios manuales universitarios, diversas publicaciones científicas (*International Journal of Remote Sensing*, *NRSC Newsletter*), y una sociedad, la *Remote Sensing Society*, muy activa en tareas de enseñanza y difusión: organiza anualmente, desde 1974, un congreso internacional en distintas universidades inglesas. El *National Remote Sensing Center*, es la institución líder en el fomento y desarrollo de la investigación (Carter, 1986).

Las autoridades francesas han realizado un gran esfuerzo en este campo, que llevó al lanzamiento del primer satélite SPOT, en 1986, continuado con el segundo satélite de la serie en febrero de 1990 (3.5.2). El proyecto fue desarrollado por el *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), con una pequeña colaboración de la *Swedish Space Corporation*. La explotación comercial de las imágenes adquiridas por este satélite se encarga a una empresa privada, *SPOT Image*, que cuenta con distribuidores en todo el mundo. En el terreno de las aplicaciones, el *Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale* (GDTA), con sede en Toulouse, ha impulsado la realización de cursos internacionales y la coordinación de las distintas instituciones gubernamentales con interés en teledetección. La producción científica no es, aún tan sustancial como en el caso de Estados Unidos o el Reino Unido, si bien está creciendo notablemente en los últimos años.

Otros países europeos han mostrado gran interés en la aplicación de esta técnica para un mejor conocimiento de sus problemas medio ambientales. En Holanda, la actividad docente e investigadora del *Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)*, con sede en Enschede, ha sido muy destacada, tanto en el campo de la docencia como de la investigación (*ITC Journal*). En la R.F. Alemana, Bélgica, Italia y los países escandinavos existen numerosos centros dedicados a este tipo de investigaciones. La Comunidad Económica Europea, como conjunto, pretende impulsar las aplicaciones de la teledetección especialmente a través del proyecto *CORINE-Land Cover*, y del programa de predicción de cosechas. Además, se están realizando trabajos en cartografía de la cubierta del suelo, inventarios forestales y de pastizal, y estudios regionales sobre áreas menos favorecidas. La mayor parte de estas iniciativas parten del *Institute for Remote Sensing Applications*, creado dentro del centro común de investigación de Ispra, para desarrollar distintas aplicaciones de la teledetección. La sola existencia de este instituto, demuestra el interés de la Europa Comunitaria para impulsar las aportaciones que esta tecnología puede brindar a los estados miembros.

Por no ampliar excesivamente esta relación, podemos concluir citando otros países en donde la teledetección espacial resulta una técnica de notable implantación. Este es el caso de Japón, Brasil y la India, empeñados en el desarrollo de proyectos espaciales propios, así como de la Unión Soviética, con una larga trayectoria en esta disciplina, aunque poco conocida para los países occidentales. Las principales organizaciones son la *National Remote Sensing Agency*, localizada en Hyderabad; el *Remote Sensing Technology Center (RESTEC)*, situada en Tokio; y el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)*, emplazado en Sao Jose dos Campos.

Tras repasar el contexto internacional, resulta conveniente detenernos sobre el estado de la teledetección en nuestro país. En ésta, como en otras tecnologías de punta, el desarrollo es desgraciadamente escaso y lento, pese a que algunos de nuestros investigadores realizaran estudios pioneros en esta línea, ya a mediados de los años setenta (Núñez, 1976). En el momento presente, existe un gran interés en la comunidad científica, pero aún no se ha consolidado como una técnica suficientemente difundida. Sólo se constata la actividad de pequeños grupos de estudiosos, mas o menos aislados entre sí, y, casi siempre, en desconexión con los organismos o empresas interesadas en obtener productos temáticos. Prueba de lo dicho, es la exigua presencia de la teledetección en los planes de estudio universitarios, y la escasísima oferta de programas de

especialización. Todo esto contrasta con el interés general por la técnica que se registra en la masiva asistencia a cursos divulgativos, o en la adquisición de equipos sofisticados por parte de empresas, departamentos universitarios o institutos de investigación, que inician su trabajo en esta línea.

Un paso esperanzador hacia la consolidación de esta técnica en nuestro país, representa la puesta en marcha de la Asociación Española de Teledetección, creada en 1989 tras cuatro años de actividades como grupo de trabajo. Entre sus logros cuenta la organización de tres congresos nacionales (Barcelona, Valencia y Madrid), y la publicación de un boletín informativo periódico. Pese a ello, sus actividades aún resultan bastante incipientes. En similares términos cabe expresarse en lo que se refiere a la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección, organizadora de cursos y seminarios sobre estas técnicas.

Tal vez una de las principales rémoras para impulsar el desarrollo de la teledetección en España, sea la inexistencia de un centro nacional, similar al NRSC inglés o al GDTA francés, que coordine los esfuerzos individuales y ponga en contacto a los expertos con el usuario final del producto. Los centros más destacados, sin pretender ser exhaustivo, son los dedicados a la producción cartográfica (Instituto Geográfico Nacional, Institut Cartogràfic de Catalunya, Junta de Andalucía), a la investigación (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Instituto Tecnológico y Geominero, Instituto de Economía y Geografía Aplicada, Instituto de Geología Jaume Almera), o a la docencia universitaria (Dpto. de Geografía de la Universidad de Alcalá, Dpto. de Termodinámica de la Universidad de Valencia), además de algunas empresas de reciente creación.

1.4. ASPECTOS LEGALES DE LA TELEDETECCIÓN

La teledetección, como ya hemos indicado, supone la observación exterior de la superficie terrestre. El satélite, como es obvio, no ajusta su órbita a las fronteras nacionales, sino que adquiere imágenes de todo el globo. Esta adquisición de datos sobre un territorio soberano, puede implicar una violación de su espacio aéreo, además de poner en evidencia recursos de un país que podrían ser explotados abusivamente por terceros. Por esta razón, se ha puesto de manifiesto la necesidad de regular jurídicamente las actividades de teledetección espacial.

El Comité de Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior ha intentado desarrollar unos principios legales que salven las tensiones entre Estados observados y observadores. El inicio de este proceso se encuentra en el tratado sobre las actividades de exploración del espacio, firmado en 1967. Allí se señalaba que "...el espacio exterior, incluso la Luna y otros cuerpos celestes, no podrá ser objeto de apropiación internacional por reivindicación de soberanía, uso o ocupación, ni mediante ningún otro medio" (*Treaty on principles governing the activities of States in the exploration and use of outer space, including the Moon and celestial bodies*, art. II).

Este acuerdo constituye el eje sobre el que se ha venido apoyando el derecho espacial en los últimos años. Sus principales definiciones consagran un doble principio: libertad de exploración y uso del espacio exterior, y empleo en provecho común, sin posibilidad de apropiación por ningún estado. En definitiva, se define el espacio exterior como un patrimonio común de la Humanidad, no sujeto a intereses nacionales.

En el congreso UNISPACE'82, celebrado en Viena, se expresó el deseo de algunos países en desarrollo por controlar la distribución de las imágenes obtenidas sobre su territorio. Además, se convino en facilitar el acceso inmediato y no restrictivo a la información detectada sobre el territorio perteneciente a cada estado, así como en solicitar la previa autorización de éste para diseminar dicha información a terceros países (OTA, 1984).

En el momento presente, las posturas son muy variadas. Algunos países de Iberoamérica, como Brasil y Argentina, abogan porque el estado propietario de la plataforma pida permiso al estado detectado para tomar la información, y porque, en ningún caso, ésta se suministre a terceros países. La Unión Soviética y Francia no están de acuerdo con el previo permiso, pero sí con proporcionar la información al estado detectado y no a terceros países. En el mismo sentido, la Unión Soviética y la India, proponen que se limite a 50 m la resolución mínima de los sensores espaciales, con objeto de mantener las normas de seguridad militar. Estados Unidos, Reino Unido y Japón, se muestran partidarios de que no existan limitaciones en la observación y distribución de los datos.

Para reconciliar estas posturas, la Comisión de Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior creó un grupo de trabajo que estudiara los problemas derivados de la teledetección espacial. Tras numerosas discusiones, este Grupo presentó en 1986 un proyecto de

principios, que fue finalmente aprobado por la Asamblea General de la ONU en diciembre de 1986. Las grandes directrices de esta legislación pueden resumirse en los siguientes puntos (Tapia, 1989):

- (i) la teledetección se realizará en provecho e interés de todos los países, de acuerdo con el derecho internacional;
- (ii) se respetará el principio de soberanía plena y permanente de los Estados sobre su propia riqueza y recursos naturales, sin perjudicar los legítimos derechos e intereses del Estado observado;
- (iii) se promoverá la cooperación internacional sobre recepción, interpretación y archivo de datos, prestándose asistencia técnica;
- (iv) deberán los Estados informar al Secretario General de la Naciones Unidas de los programas de teledetección que se propongan desarrollar, así como a los Estados interesados que lo soliciten;
- (v) se informará a los Estados afectados para prevenir fenómenos perjudiciales para su medio ambiente, y contarán con acceso sin discriminación y a un coste razonable, de los datos obtenidos sobre su territorio.

Estas líneas parecen marcar la evolución reciente del derecho espacial en lo que afecta a actividades de teledetección. La amplitud de estas actividades a otros países más allá de Estados Unidos y la Unión Soviética (caso de Japón, Canadá, India o Brasil), tiende a liberalizar aún más las disposiciones adquiridas, si bien no resultan todavía muy eficientes los mecanismos de transferencia tecnológica hacia terceros países, casi siempre los más necesitados de una información tan valiosa sobre sus propios recursos naturales.

1.5. PRINCIPALES APLICACIONES

No es el objeto de esta obra presentar las aplicaciones de la teledetección, sino únicamente introducir los fundamentos de trabajo que puedan ser utilizados por cualquier científico con preocupación por el territorio que le rodea.

No obstante, parece lógico dedicar un epígrafe a apuntar las aportaciones de esta técnica a diversas ciencias del medio ambiente. Esto puede darnos una idea de sus posibilidades de cara a un mejor conocimiento del espacio que nos circunda. La siguiente relación se extrae de la bibliografía disponible; esto es, se trata de temas en los que la teledetección ya ha demostrado su aplicabilidad. En el citado informe de la OTA (1984), se destacaban las siguientes áreas de aplicación (fig. 1.4):

- Estudio de la erosión de playas y arenales.

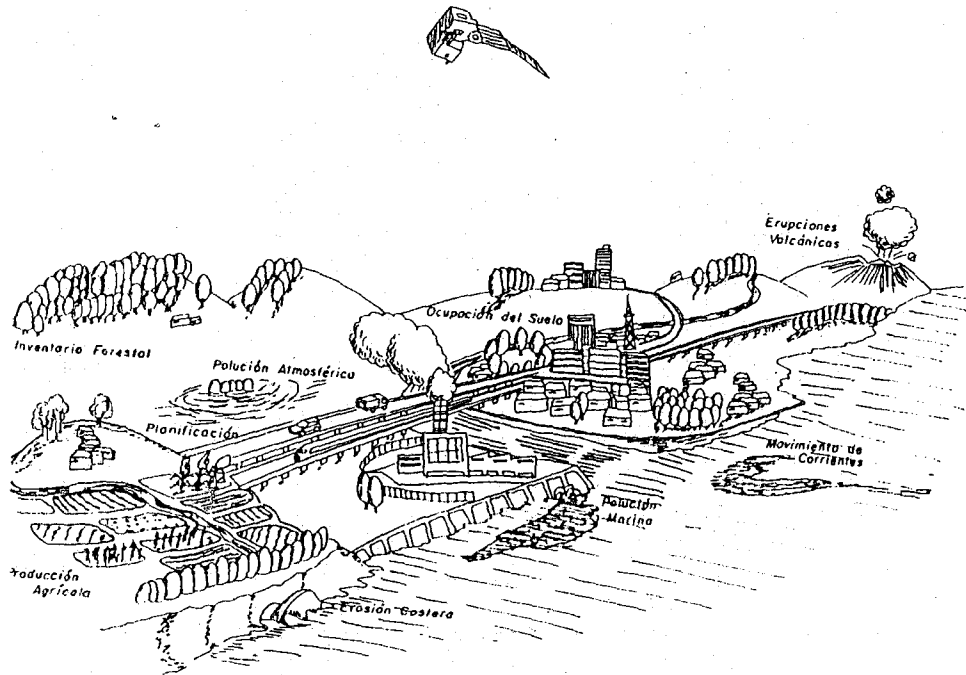


Fig. 1.4 - Aplicaciones de la teledetección espacial (Adaptado de NASDA, 1987)

- Inventario regional del medio ambiente para preparar estudios de impactos ambientales.
- Cartografía geológica para la exploración mineral y petrolífera.
- Cartografía de nuevos depósitos volcánicos.
- Control de la acumulación nival, de la fusión y de los cambios previsibles en la disponibilidad de energía hidroeléctrica.
- Control del movimiento de icebergs en zonas polares.
- Estimación de modelos de escorrentía y erosión.
- Inventario del agua superficial.
- Análisis en tiempo real de masas nubosas de escala media y pequeña.
- Medidas de aguas superficiales y humedales para evaluar la situación del hábitat para aves acuáticas.
- Verificación de contenidos de salinidad en las principales corrientes de agua.
- Cartografía térmica de la superficie del mar.

- Verificación y control de la calidad física del agua, turbidez y contenido de algas.
- Control de los movimientos del *Gulf-Stream* y otras corrientes marinas.
- Cartografía de la cobertura vegetal del suelo.
- Rápida evaluación de condiciones de estrés en la vegetación, por efectos de la sequía o deforestación.
- Cartografía de áreas quemadas y seguimiento de los ritmos de repoblación natural.
- Contribución a la cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo.
- Realización de inventarios forestales.
- Selección de rutas óptimas para nuevas vías de comunicación.
- Control de pastizales efímeros para estudiar efectos de la sequía y excesivo pastoreo.
- Cartografía e inventario de cultivos por especies.
- Predicción del rendimiento de cultivos.

Esta relación puede ampliarse y enriquecerse con la consulta a los principales manuales que dedican un amplio espacio a las aplicaciones de esta técnica. Entre otros, Campbell (1987), Colwell (Ed.) (1983, pp. 1233-2417), Harris (1987, pp. 107-185), Hall y Martinec (1985), Lillesand y Kiefer (1987), Lo (1986, pp. 40-368), Mulders (1987), Szekielda (1988, pp. 148-303).

1.6. LAS VENTAJAS DE LA OBSERVACIÓN ESPACIAL

Esta larga relación de temas de estudio, parece conducirnos a subrayar el interés de esta técnica para un amplio abanico de disciplinas. La mayor parte de las aplicaciones arriba reseñadas no son exclusivas de la teledetección espacial, sino que comparten su empleo con la fotografía aérea y los trabajos de campo. No obstante, el uso de la teledetección espacial facilita, en esos casos, un apoyo muy conveniente para reducir los costes o el tiempo invertido en obtener resultados. Ambos elementos, costes y tiempo, se justifican por las propias características de la observación espacial. En breves términos, esta técnica aporta -frente a la fotografía aérea- las siguientes ventajas:

(i) Cobertura global y periódica de la superficie terrestre. Gracias a las características orbitales del satélite podemos obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la Tierra, incluso de áreas inaccesibles por otros medios (zonas polares o desérticas, por ejemplo).

(ii) Visión panorámica. La altura orbital del satélite le permite

detectar grandes espacios, proporcionando una visión amplia de los hechos geográficos. Una fotografía aérea, escala 1:18.000 capta en una sola imagen un superficie aproximada de 16 km², que asciende a unos 49 km² en el caso de fotografías de mayor altitud (1:30.000). Una imagen Landsat nos permite contemplar 34.000 km² en una sola adquisición, cifrándose en 9 millones de km² los abarcados por una imagen del satélite meteorológico NOAA.

(iii) Homogeneidad en la toma de datos. Tan vasta superficie se detecta por el mismo sensor, y en una fracción muy pequeña de tiempo, lo que asegura la necesaria coherencia para abordar un estudio sobre grandes espacios.

(iv) Información sobre regiones no visibles del espectro. Los sensores ópticos-electrónicos facilitan imágenes sobre áreas no accesibles con la fotografía convencional: infrarrojo medio y térmico, micro-ondas. Estas bandas del espectro proporcionan una valiosa información para estudios medio ambientales, registrando problemas imperceptibles al ojo humano.

(v) Por último, el formato digital de las imágenes agiliza su tratamiento -con la ayuda de los equipos adecuados-, y reduce costes para integrar posteriormente los resultados con otro tipo de cartografía más convencional.

Esta relación no implica, naturalmente, que consideremos a la teledetección espacial como una panacea para detectar cualquier problema que afecte al medio ambiente. Esta observación es complementaria con otras técnicas convencionales, como la fotografía aérea, y no invalida la importancia del trabajo de campo. En otras palabras, es una técnica auxiliar más, idónea en múltiples contextos y discreta en otros, en los que su aplicación resulta sólo un ensayo experimental.

1.7. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Como antes se indicó la teledetección es una técnica bastante reciente, pese a lo cual la producción bibliográfica resulta ya considerable. En el panorama internacional, se cuenta con numerosos congresos, revistas especializadas, manuales e informes de investigación centrados en esta tecnología. Esto explica la existencia de diversos catálogos bibliográficos (Carter, 1986; Hyatt, 1988), y de varias series periódicas dedicadas a la recopilación de literatura científica en este campo. Los más importantes, a este respecto, son: *Earth Resources: A Continuing Bibliography with Indexes*, publicada por NASA desde 1962, y *Geographical Abstracts, G: Remote Sensing, Photogrammetry and Cartography*, publicada por Geo Abstracts. En la misma línea, se sitúa la creación de bases bibliográficas

especializadas en teledetección, caso de la canadiense RESORS (*Remote Sensing Online Retrieval System*), o la inglesa GEOBASE.

Los Congresos más destacados son los que organizan las sociedades profesionales: *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), *Remote Sensing Society* (RSS), y *European Association of Remote Sensing Laboratories* (EaRSEL). Todos ellos cuentan con una periodicidad anual. Cuentan también con gran prestigio la serie de congresos denominados *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, organizados por el ERIM, los denominados *Machine Processing of Remotely Sensed Data*, que coordina el LARS, y los *Pecora Symposium*, centrados en aplicaciones medio ambientales.

En el capítulo de revistas especializadas, las más destacadas son: *Canadian Journal of Remote Sensing*, *Geocarto International*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *International Journal of Remote Sensing*, *ITC Journal*, *Photogrammetria*, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *Remote Sensing of Environment*, *Remote Sensing Quarterly*, *Remote Sensing Reviews*, *Soviet Journal of Remote Sensing*.

Existen algunas obras publicadas con un amplio catálogo de imágenes adquiridas por distintos sensores espaciales. Las más interesantes y cuidadas son las denominadas *Earth Watch* (Sheffield, 1981) y *Man on Earth* (Sheffield, 1983), ambas de gran calidad, basadas exclusivamente sobre imágenes Landsat. Otras obras, de calidad y planteamiento similar son *Images of Earth* (Francis y Jones, 1984), que incluye algunas fotografías tomadas desde el transbordador espacial norteamericano, y *Mission to Earth: Landsat views of the World* (NASA, 1976). Con un criterio más cartográfico, destaca la obra de la casa alemana Westerman, traducida posteriormente al inglés (Smith, 1984), así como los atlas nacionales del Reino Unido (Bullard y Dixon, 1985) y de algunas regiones españolas (Sancho y Chuvieco, 1986). De similar contenido, es el ensayo cartográfico realizado por varios autores del Este europeo, con la novedad de incorporar fotografías adquiridas por plataformas soviéticas, poco accesibles en los países occidentales (Sagdejew et al, 1982).

Por último, un buen termómetro del grado de desarrollo que ha alcanzado esta disciplina refiere a la gran cantidad de manuales universitarios disponibles, una buena parte de ellos de muy reciente publicación. Entre las múltiples referencias de este tipo, merecen destacarse las obras de Barret y Curtis (1982), Campbell (1987), Colwell (Ed, 1983),

Curran (1985), Hall y Martinec (1985), Harris (1987), Harper (1983), Holz (1985), Jensen (1986), Lillesand y Kiefer (1987), Lo (1986), Mather (1987), Mulders (1987), Richards (1986), Sabins (1986), Schowengerdt (1983), Short (1982), Swain y Davis (1978), Szekiela (1988) y Townshend (1981)

2. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

En el capítulo anterior se presentaban algunos aspectos introductorios de las técnicas analizadas en esta obra. En los dos próximos, se van a exponer los procesos que permiten la adquisición de la imagen, para dedicar el resto a las tareas de interpretación. Como científicos con preocupación por el medio ambiente, lo habitual será que estos últimos sean los que merezcan una mayor atención. Sin embargo, como es obvio, la interpretación de la imagen será tanto más rigurosa, cuanto mayor conocimiento se tenga de los procesos que permitieron adquirirla.

2.1. FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA

Anteriormente se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además, no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que le ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este sencillo ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que permite poner a ambos en relación. En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (fig. 2.1).